

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2018.01.006

引用格式: 万方来, 蒋金晶. 音频大地电磁测深法在辽宁瓦房店金伯利岩矿区的应用[J]. 华东地质, 2018, 39(1): 42-49.

音频大地电磁测深法在辽宁瓦房店 金伯利岩矿区的应用

万方来, 蒋金晶

(辽宁省第六地质大队, 大连 116200)

摘要: 辽宁瓦房店地区是我国著名的金刚石矿产地之一, 前人在该区做过大量的研究工作, 但找矿方法一直没有突破。本文采用音频大地电磁测深法 (AMT) 对已知的金伯利岩矿区进行试验, 探讨 AMT 技术在金伯利岩矿区深部探测的应用效果。针对 30 号金伯利岩岩管区布设了 5 条剖面, 结果显示岩管呈低阻反映, 异常明显。结合地质资料, 初步推断该区断裂、成矿带和低阻异常展布特征, 为在该区进一步开展矿产勘查提供基础资料, 对今后瓦房店地区寻找隐伏的金伯利岩体具有重要意义, 也为其他类似地区寻找隐伏金伯利岩提供新思路。

关键词: AMT; 金伯利岩; 试验; 隐伏岩体; 瓦房店

中图分类号: P619.24⁺1; P631

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2018)01-042-08

辽南地区是我国著名的金刚石产地, 前人在此地区对金刚石原生矿分布规律、地质特征、矿物岩石特征、含矿性及地球化学特征等做过相关研究^[1-6], 并取得了众多成果。但就找矿方法而言, 目前还没有取得实质性突破。以往金刚石找矿, 基本以地质填图、水系重砂追索、高精度磁法圈定异常、钻探验证为主要手段。随着地表资源开发程度的提高, 发展深部找矿、圈定深部成矿有利地段、寻找矿集区深部第二空间成为今后金刚石勘查的重要趋势^[7-9]。瓦房店地区隐伏金伯利岩矿主要分布在距离地表 200 m 以下范围, 在深部矿体位置不明确的情况下, 难以布设钻探和坑探工程。AMT 具有勘探深度大、分辨能力强、成本低等特点, 是研究深部地质构造和寻找隐伏矿的有效手段^[10-13]。

本文对辽宁省瓦房店 30 号岩管开展 AMT 法应用效果试验, 取得了明显效果, 对今后瓦房店地

区乃至整个华北地台寻找隐伏的金伯利岩体具有重要意义。

1 矿区地质特征及岩石电性分析

1.1 矿体地质特征

30 号岩管是瓦房店矿田第二大岩管, 由浅部岩体和隐伏岩体 (30-2) 组成。浅部岩体呈不规则椭圆形, 长轴方向为 70°, 长为 212 m, 短轴方向为 20°, 最宽约 106 m, 最窄为 60 m, 平均宽约 80 m, 地表面积为 14 000 m²。浅部岩体向下延伸为筒状, 倾向 SE, 倾角约 50°, 在 +20 m 标高以下岩体急骤收缩呈倾角较缓的脉状体, 岩体呈近 EW 向延伸, 略为扁长的烟斗状^[14]。隐伏岩体 (30-2) 位于 30 号岩管南东 200 m 深部, 岩体赋存最高部位为 -40 m 标高处, 岩脉和 30 号岩体相连, 顶部与岩层产状一致, 下部岩体倾角较陡, 略向南倾斜, 倾角为 80°~85°。岩体呈椭圆形, 长轴的走向为 75°, 向下转为 EW 向。岩体的中部最宽,

* 收稿日期: 2017-01-13 修订日期: 2017-04-14 责任编辑: 谭桂丽

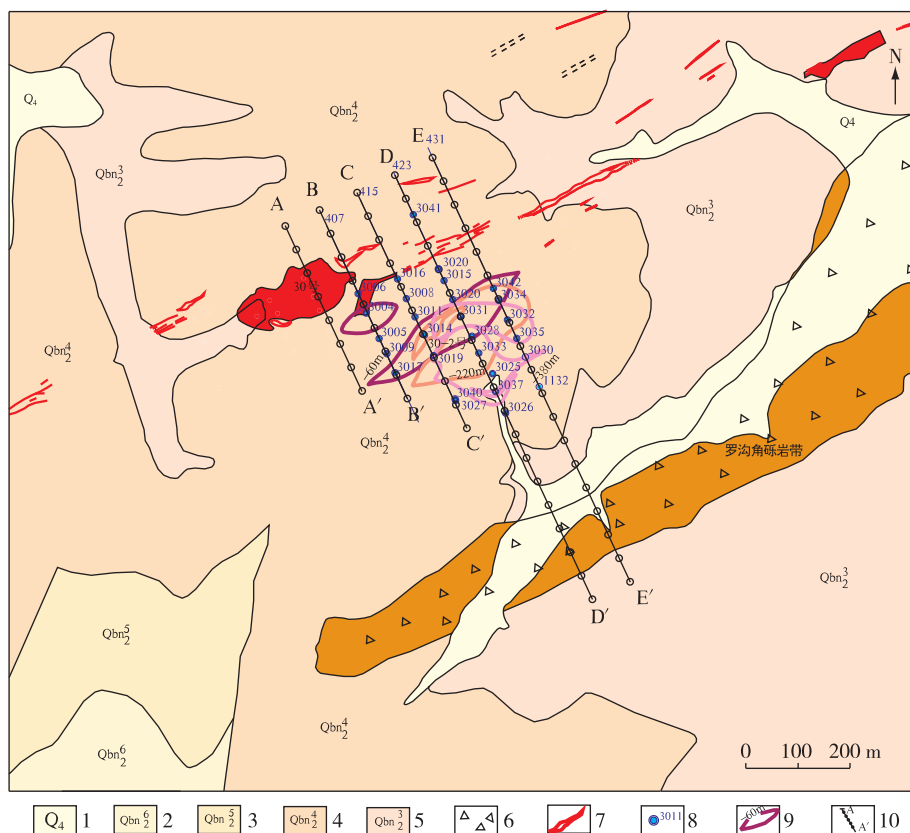
基金项目: 中国地质调查局“整装勘查区找矿预测与技术应用示范”子项目“辽宁省瓦房店整装勘查区专项填图与技术应用示范 (编号: 12120114027901)”项目资助。

第一作者简介: 万方来, 1988 年生, 男, 工程师, 主要从事金刚石矿产勘查工作。

在-840 m标高以下仍未尖灭,尚有延深趋势。30号岩管未受较大构造和岩浆活动破坏(图1)。

30号岩管由金伯利岩岩浆上升爆破形成,具有火山角砾岩筒特征,形成含金伯利岩物质的角砾

岩,多分布在岩管西南部和南部。在30-2号岩管中,含金伯利岩物质角砾岩多集中在岩管中部,爆破时由于围岩易从脆弱的节理面和层面上震裂,故岩管边界与节理面和裂隙面相互平行。



1. 第四系;2. 紫色泥灰岩夹页岩;3. 浅灰色薄层泥灰岩;4. 灰色中薄层泥灰岩;5. 灰色薄—中厚层条带状泥灰岩;6. 角砾岩;7. 金伯利岩;8. 施工钻孔及编号;9. (30-2)号岩管不同标高水平投影;10. 音频电磁测深剖面。

图1 30号金伯利岩管地质图

Fig. 1 Map showing geology of the study area and location of the No.30 kimberlite pipe

30号岩管围岩为新太古代城子坦组片麻岩、青白口纪钓鱼台组和南芬组,在深约500 m处见片麻岩。围岩产状平缓,蚀变极其微弱。岩管中有大量围岩捕掳体,包括片麻岩、泥灰岩、页岩、石英砂岩、粉砂岩,以及上部围岩塌落入岩管中的结晶灰岩、生物碎屑灰岩、鲕状灰岩和石英岩等。

1.2 岩石电性分析

矿区岩石及矿石物性测定统计见表1。结合岩管区勘探线提供的地层信息,将该区岩石电阻率分为3类。第一类为沉积地层,30号岩管区主要发育南芬组下段及中段,该组泥灰岩电阻率最高,电阻率为1 000~40 000 $\Omega \cdot \text{M}$,其次为石英砂岩,电阻率均值为1 211 $\Omega \cdot \text{M}$,页岩及粉砂岩电阻率最低,

电阻率均值为155 $\Omega \cdot \text{M}$;第二类为变质岩,黑云角闪片麻岩电阻率为2 000~30 000 $\Omega \cdot \text{M}$,变粒岩电阻率均值为14 320 $\Omega \cdot \text{M}$;第三类为矿体岩石,以金伯利岩为主,与第2类变质岩相比,其电阻率较低,电阻率值为50~500 $\Omega \cdot \text{M}$ 。上述3类岩石的电阻率可反映其相对导电性,沉积岩中的泥灰岩表现相对高阻,页岩及粉砂岩表现相对低阻,石英砂岩表现相对中低阻,黑云角闪片麻岩及变粒岩表现相对高阻,金伯利岩表现相对低阻。若岩管深部存在金伯利岩,其与围岩和上覆泥灰岩间应存在一定的电阻率差异,当具有一定规模时可形成明显低阻异常。另外,对比岩管区内沉积岩中的页岩、粉砂岩及石英砂岩与金伯利岩的电阻率,发现其幅值差异

较小,在沉积岩中判断是否存在矿体需结合地质及构造等因素综合分析,但沉积岩作为上覆岩层,其厚度较下部的太古代变质岩系小。因此,该区具备利用电磁测深法探查深部金伯利岩的地球物理前提。

表 1 30 号岩管区岩石物性测定统计表

Table 1 Physical property statistics of rocks and ores from the No. 30 kimberlite pipe and its neighboring areas

样品	块数	电阻率幅值/ $\Omega \cdot m$	电阻率均值/ $\Omega \cdot m$
泥灰岩	5	1 000~40 000	32 195
页岩	4	115~281	170
粉砂岩	9	77~200	140
闪长玢岩	3	2 000~12 303	8 120
碳酸盐化金伯利岩	6	100~150	117
金伯利岩	10	50~500	213
黑云角闪片麻岩	5	2 000~30 000	20 960
石英砂岩	4	1 120~1 390	1 211
辉绿岩	4	1 761~4 071	2 978
斑状金云母金伯利岩	10	60~70	66
含围岩角砾金伯利岩	10	50~100	71
含岩球的斑状金伯利岩	10	80~100	93
含金伯利岩物质角砾岩	10	300~500	396
破碎带	4	200~2 515	1 543
变粒岩	6	6 722~23 986	14 320

2 AMT 工作方法

音频大地电磁测深法(AMT)是基于麦克斯韦电磁感应原理,根据不同频率的电磁信号反应地下不同深度的电性信息,从而探测地下介质电性分布特征的物探方法。本次野外施工主要采用加拿大 PHOENIX 公司生产的 V8 和 3E 多功能电法仪,V8 测量系统通过 GPS 和 UTC 时间同步,结合热晶振器件(OCXO),长期锁定精度为 $1 \mu s$ 或更精确,实现各测站间同步,从而提高野外工作效率。野外数据采集时间一般控制在 1 小时左右,从高频到低频,根据观测时间长短和后期数据解编、变换,获得数据频率范围为 $10\ 400 \sim 0.86\ Hz$,共 55 个频率。

2.1 数据处理方法

野外施工测量布设的电极或磁探头方位可能因实际调整而发生变动,因此在数据处理前,需核

对各测点的电道布设方位、磁探头埋设方位及电道极距,并将南北电极 E_x 方位和 H_x 磁探头旋转至测线北。确定同一排列的各测点数据采集时间,建立傅里叶变换公式,保证数据质量,将全部测点的前 2 分钟采集时间切除。选择再处理参数,采用近磁参考道、互磁参考道或远磁参考道等方式处理数据,必要时选择远电参考道方式提高数据质量。按照“先编辑视阻抗相位,后编辑视电阻率曲线”步骤,删除不超过 3 个的连续频点,删除频点总数不超过 15%。在该阶段处理中,由于天然场死频带对应频率的数据波动较大,为尽可能保留全部频点数据,除极个别幅值较大跳点做删除处理,基本保留全部数据。

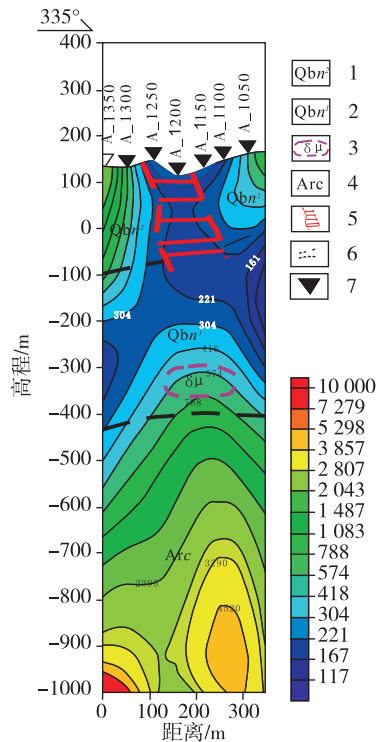
2.2 数据反演

本次 AMT 数据反演借助加拿大研发的 WinG-Link 软件完成。以 A-A' 线 1 000 点为例,天然场死频带对应频率的数据采取按全频段曲线趋势平滑处理;为确保二维反演数据收敛及反演结果的有效性,对低频段数据质量较差的频点采取删除处理。预处理编辑结束后,对多种分量组合模式进行反演。经过实验比较,选择 TM+TE 多分量联合 2 维带(2D)地形反演。A-A'、B-B'、C-C' 3 条线反演深度为 1 000 m,D-D'、E-E' 2 条线反演深度为 1 500 m。

3 成果解译与分析

3.1 A-A' 线反演剖面

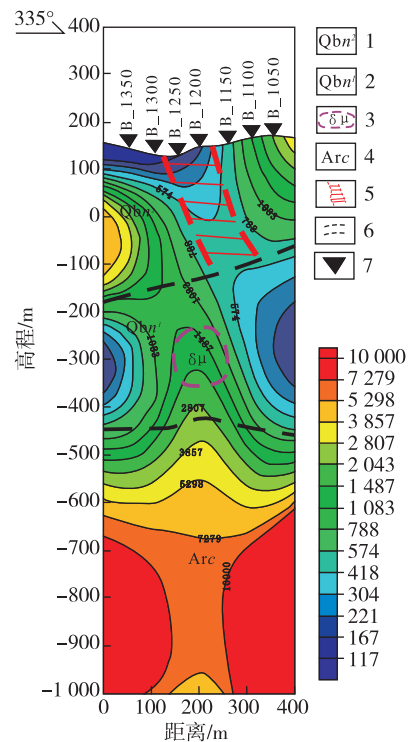
从 A-A' 线二维反演电阻率等值线图(图 2)可知,二维反演结果在纵向上具有较好的成层性,静态效应及近地表不均匀体基本得到抑制。对比反演电阻率断面图与勘探线剖面(图 4)可知,近地表电阻率变化与现有勘探线剖面相吻合。剖面横向上电阻率具有“高、低、高”的变化特征,对应勘探线剖面中金伯利岩与围岩的位置。图 2 中黑色虚线指示推测的地层界线,标高约 -50 m 上部中高值的电阻率推测为青白口纪南芬组二段泥灰岩;该层下部至标高 -400 m 附近,电阻率的低值推测为青白口纪南芬组一段页岩、砂质页岩及粉砂岩互层。该组地层中,反演断面图中紫色线圈出部位的电阻率值略高于其背景值,应为穿切于该组地层的闪长玢岩脉与该组地层岩性的综合反映;该组地层下部电阻率的高值推测为太古代城子坦组斜长角闪片麻岩。反演剖面图中 1 200~1 250 点,红色线圈出的范围



1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 闪长玢岩;4. 太古代城子坦组;5. 推测成矿带;6. 推测地质界线;7. 测点位置。

图 2 A-A'线反演剖面图

Fig. 2 Inversion profile of the A-A' line



1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 闪长玢岩;4. 太古代城子坦组;5. 推测成矿带;6. 推测地质界线;7. 测点位置。

图 3 B-B'线反演剖面图

Fig. 3 Inversion profile of the B-B' line

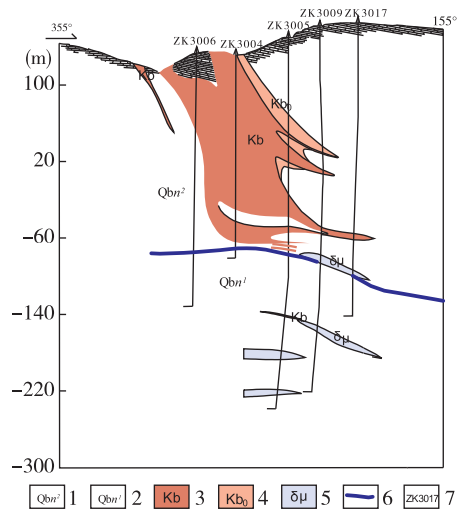
推测为金伯利岩赋存部位,与勘探线剖面中矿体位置、宽度及倾向基本吻合,低阻异常为金伯利岩筒的反映。

3.2 B-B'线反演剖面

从 B-B'线二维反演电阻率等值线图(图 3)可知,该剖面所反映的地层分层与 A-A'线剖面相似,分界面与勘探线剖面基本吻合。地表至地下黑色虚线处指示推测的地层界线,分别为青白口纪南芬组二段泥灰岩、青白口纪南芬组一段页岩、砂质页岩及粉砂岩互层和太古代城子坦组斜长角闪片麻岩。受穿切于南芬组下段闪长玢岩脉(图 3 紫色线圈出位置)影响,电阻率略高于背景值的区域较 A-A'线剖面大。图中红色虚线圈出部位推测的成矿带与 A-A'线剖面具有一定的相关性,其位置、宽度及倾向与勘探线剖面(图 4)相吻合。

3.3 C-C'线反演剖面

从 C-C'线二维反演电阻率等值线图(图 5)可

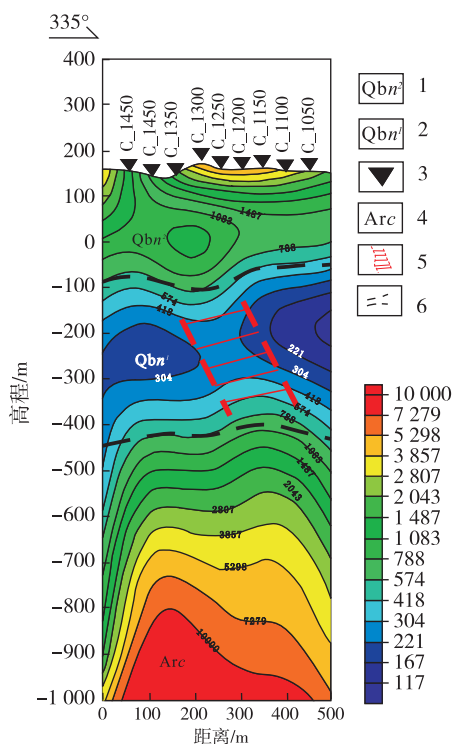


1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 金伯利岩;4. 含金伯利岩物质角砾岩;5. 闪长玢岩;6. 地层分界线;7. 钻孔位置及编号。

图 4 407 勘探线剖面示意图

Fig. 4 Schematic section diagram of exploration line 407

知,由地表至地下二维反演结果的成层性较好,推测各层所属年代、岩性与 A-A'线剖面、B-B'线剖面相同,分层界线为图中的黑色虚线处。地表1 000~1 300点之间断面出现电阻率低值,推测南芬组二段泥灰岩发育风化裂隙。图中红色线圈出部位为推测成矿带,该成矿带穿切穿于南芬组一段,矿带北端在南芬组二段与太古代地层接触部位具有向深部延伸的趋势,向深部逐渐尖灭。结合野外地质填图,地表浅部1 300~1 500点之间应为金伯利岩矿体露头,由于受裂隙影响,在反演断面图上反应并不明显(图 6)。



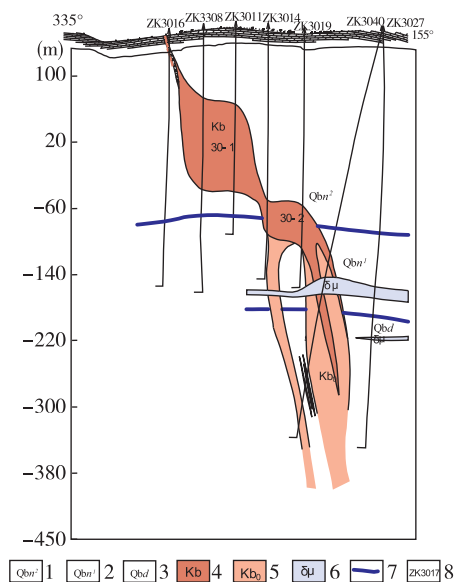
1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 测点位置;4. 太古代城子坦组;5. 推测成矿带;6. 推测地质界线。

图 5 C-C'线反演剖面图

Fig. 5 Inversion profile of the C-C' line

3.4 D-D'线反演剖面

从 D-D'线二维反演电阻率等值线图(图 7)可知,反演断面图纵向上具有较好的成层性,分层与 A-A'线、B-B'线、C-C'线剖面相似,图中黑色虚线指示分层位置。在太古代城子坦组中,测线南侧(小号点端)等值线向下扭曲变形,有一明显向下弯曲的弧形,且该处电阻率值较两侧低,推测该处为一



1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 青白口纪钓鱼台组;4. 金伯利岩;5. 含金伯利岩物质角砾岩;6. 闪长玢岩;7. 地层分界线;8. 钻孔位置及编号。

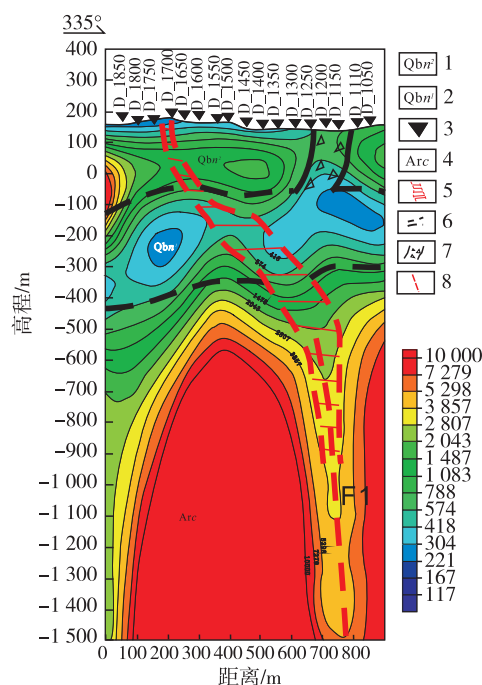
图 6 415 勘探线剖面示意图

Fig. 6 Schematic section diagram of exploration line 415

断裂,命名为 F_1 。推测受 F_1 断裂控制的成矿带在太古代地层中分布在断裂两侧,且该成矿带具有由深部向浅部延伸的趋势,穿过南芬组一段至南芬组二段灰岩层,在地表1 700点附近出露。通过与已知勘探线剖面(图 8)对比,推测的成矿带与图 8 中成矿带位置及倾向基本吻合。反演断面图上1 100~1 250点之间的低阻异常,与罗沟角砾岩带位置相吻合,且该角砾岩带形成的低电阻区具有向推测成矿带附近延伸的趋势,推测该岩体与金伯利岩矿体均受推测的 F_1 断裂控制。

3.5 E-E'线反演剖面

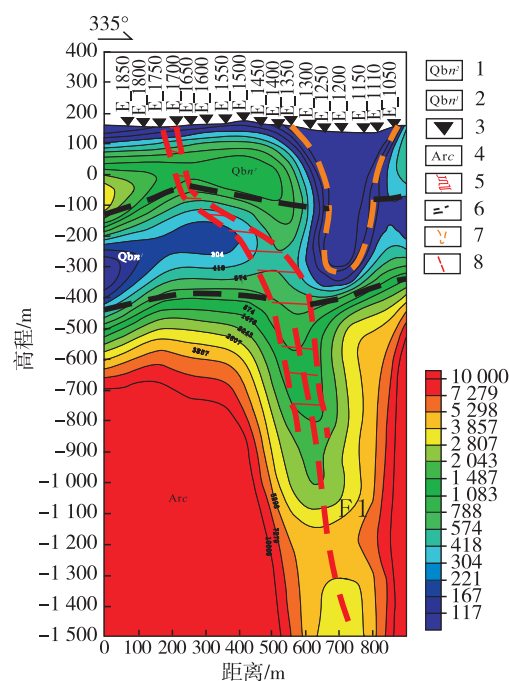
从 E-E'线二维反演电阻率等值线图(图 9)可知,反演断面图纵向上成层性与上述 4 条剖面相同,分层界线为图中黑色虚线处。推断的深部控矿断裂 F_1 位于测线南端小号点一侧。深部推测受断裂控制的成矿带宽度大于 C-C'线剖面,其倾向及延伸与 C-C'线剖面具有一定的相关性。该成矿带在上覆南芬组一段及二段均有延伸(图中红色虚线圈定的带状异常),推测该成矿带穿切于 1750 点附近在地表出露,与勘探线剖面(图 10)基本吻合。反演断面图中南端 1100~1300 点有一明显的较低阻漏斗状异常,底部延伸至南芬组一段底界面,可能为受测



1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 测点位置;4. 太古代城子坦组;5. 推测成矿带;6. 推测地质界线;7. 角砾岩带;8. 推测断层。

图 7 D-D'线反演剖面图

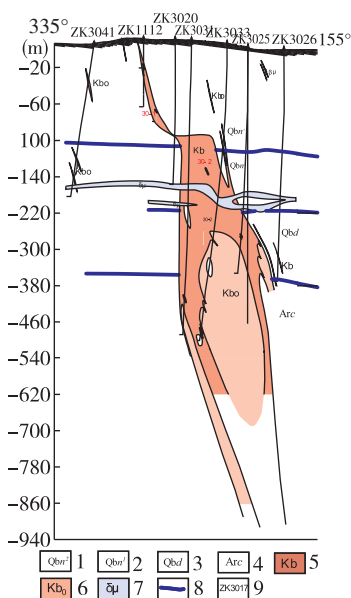
Fig. 7 Inversion profile of the D-D' line



1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 测点位置;4. 太古代城子坦组;5. 推测成矿带;6. 推测地质界线;7. 村庄及人文干扰;8. 推测断层。

图 9 E-E'线反演剖面图

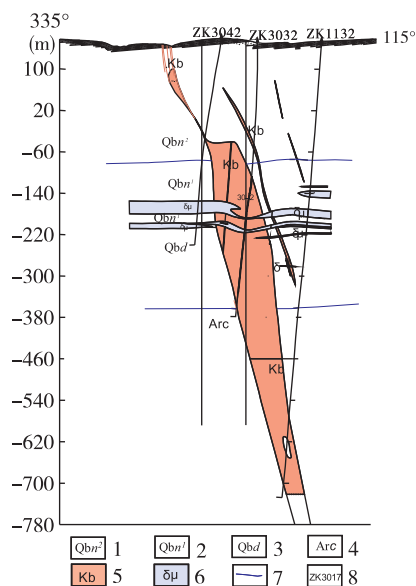
Fig. 9 Inversion profile of the E-E' line



1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 青白口纪钓鱼台组;4. 太古代城子坦组;5. 金伯利岩;6. 含金伯利岩物质角砾岩;7. 闪长玢岩;8. 地层分界线;9. 钻孔位置及编号。

图 8 423 勘探线剖面示意图

Fig. 8 Schematic section diagram of exploration line 423



1. 青白口纪南芬组二段;2. 青白口纪南芬组一段;3. 青白口纪钓鱼台组;4. 太古代城子坦组;5. 金伯利岩;6. 闪长玢岩;7. 地层分界线;8. 钻孔位置及编号。

图 10 431 勘探线剖面示意图

Fig. 10 Schematic section of exploration line 431

区村庄影响导致的高频数据精度下降。

通过上述分析可知,30号岩管区5条AMT电阻率断面图较好地反映了地下地层及岩体的变化特征。横向上对比5条剖面,3组地层产状均较平缓,局部受矿体穿切、闪长玢岩脉及断裂影响,等值线表现出不规则的弯曲状。根据地质资料,地表至地下深部分别为新元古代青白口纪南芬组二段、南芬组一段及太古代城子坦组,岩性依次为泥灰岩、页岩、砂质页岩及粉砂岩互层以及斜长角闪片麻岩,对应于反演剖面图的电阻率值表现出“由中高阻、低阻到高阻”的变化特征,3组地层分界线推测在标高-50 m和-400 m附近(图11黑色虚线处)。根据测区电阻率物性条件、浅层地质填图和

已知勘探线信息,利用AMT电阻率断面图推断A-A'、B-B'、C-C'3条剖面标高在-1 000 m以上,D-D'、E-E'2条剖面标高在-1 500 m以上的地电断面(图11)。推测出1条深部控矿断裂 F_1 ,该断裂倾向东南,倾角,约 85° ,将该断裂于标高-1 000 m投影至地表,判断其走向为NEE,与区域上具有导矿、储矿作用的构造走向基本吻合。南芬组推测成矿带主要依据浅层地质填图及已知勘探线信息,太古代地层推测的成矿带主要受推测的 F_1 断裂控制,分布在 F_1 断裂两侧,矿带推测深度为标高-1 000 m,向下逐渐尖灭。由于断裂不仅具有导矿、储矿作用,还具有储水作用,对厘定矿体空间位置造成干扰,因此,推测的低阻成矿带也可能为构造破碎带。

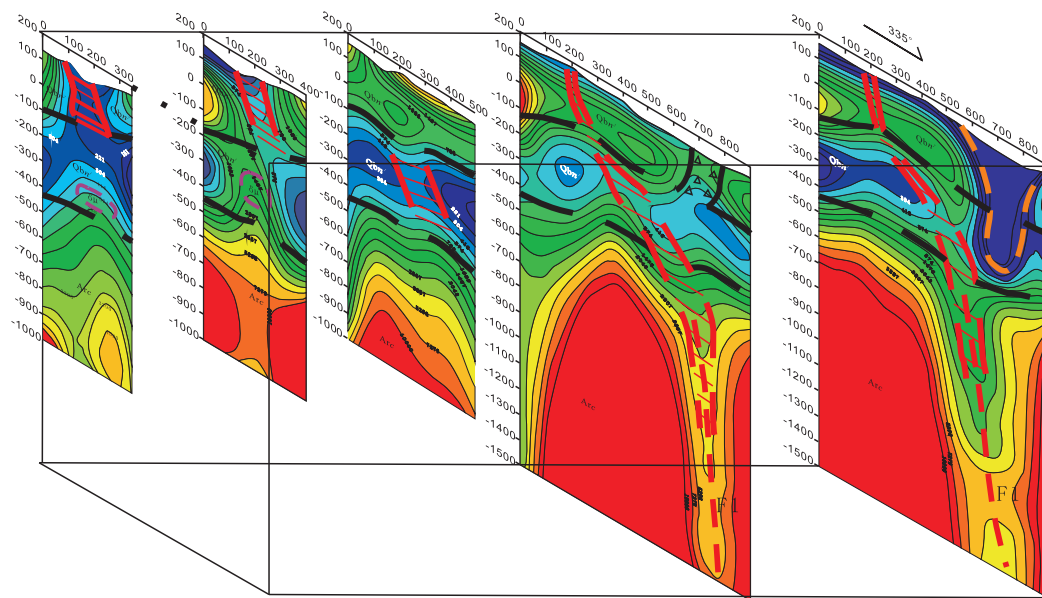


图11 30号岩管区AMT反演断面立体示意图

Fig. 11 AMT inversion section stereograph of the No.30 pipe area

4 结 论

(1)瓦房店地区30号金伯利岩岩管主要由金伯利岩与含金伯利岩物质角砾岩组成,与围岩青白口纪南芬组地层在电阻率上具有明显差异。岩管呈低阻反映,异常明显。

(2)通过AMT资料解译,推断 F_1 断裂,呈NEE向,倾向ES,倾角约 85° ,是30号岩管区的主要控矿构造。

(3)30号金伯利岩管推测的成矿带与已知矿带在位置和产状上基本吻合,受推测的 F_1 构造控制。

参考文献

- [1] 万方来,蒋金晶.华北地台金刚石找矿前景及成矿预测[J].地质与资源,2015,24(3):218-225.
- [2] 董振信.我国金伯利岩型金刚石矿床的若干地质特征及其找矿标志[J].矿床地质,1991,10(3):255-264.
- [3] 张宏福, Menzies M A, 路凤香,等.华北古生代地幔岩捕虏体中石榴石和巨晶石榴石的主、微量元素[J].中国科学(D辑),2000,30(2):133.
- [4] 董振信,从安东,韩柱国.金伯利岩含金金刚石性的矿物学判别标志[J].矿床地质,1993,12(1):48-54.
- [5] 种瑞元.金伯利岩的岩石化学特征与含金金刚石程度的判别[J].地球化学,1981(4):356-364.

- [6] 张宏福,杨岳衡.华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征[J].岩石学报,2007,23(2):285-294.
- [7] 张立,丁凯.从“二维”到“三维”我国地质填图迈入新时代[N].中国矿业报,2011-08-30(A3).
- [8] 姚大为,朱威,王大勇,等.音频大地电磁法在武山外围深部勘查中的应用[J].物探与化探,2015,39(1):100-103.
- [9] 喻春,陈永凌,李建忠,等.可控源音频大地电磁法在高楼山金矿深部找矿中的应用[J].黄金科学技术,2016,24(1):59-63.
- [10] 郭毅.音频大地电磁法(AMT)在某铜镍矿勘查中的应用[J].新疆有色金属,2011,34(3):24-25.
- [11] 张景,陈国光,张明,等.宁芜盆地白象山矿区物化探异常特征及找矿意义[J].华东地质,2016,37(2):147-151.
- [12] 李双喜,郭坤一,宋世明,等.宁芜北部铜(金)多金属矿深部找矿地质与地球物理模型研究[J].华东地质,2016,37(4):266-274.
- [13] 张景,陈国光,曾勇,等.综合找矿方法在宁芜北火山岩覆盖区的应用——以南门头工区为例[J].华东地质,2016,37(3):221-228.
- [14] 韩柱国.辽宁省复县金刚石原生矿床地质研究报告[R].沈阳:辽宁省第六地质大队,1982:38-40.

AMT application in kimberlite ore district in the Wafangdian area, Liaoning Province

Wan Fang-lai, Jiang Jin-jing

(The Sixth Geological Brigade of Liaoning Province, Dalian 116200, China)

Abstract: The Wafangdian area located in Liaoning Province is well known for its rich diamond resources. Many researchers have carried out scientific study here, but so far there has been no technological breakthrough made in prospecting methods. This report carried out an experiment test for audio-magneto-tellurics (AMT) application in the well-known kimberlite field, and also explored the effect of AMT application in deep detection. Five sections were designed specifically in the No. 30 kimberlite pipe, and the AMT results show that the pipe is characterized by low resistivity and distinct anomaly. On the basis of the geological data, we can preliminarily infer that the area presents the distribution characteristics of fault structure, metallogenic belt and low resistivity anomaly. This will provide the fundamental information for further exploration of mineral resources, and be of the importance in searching kimberley rock mass in the Wafangdian. This study provides new ideas for searching concealed kimberlites in other similar areas.

Key words: AMT; kimberlite; experiment; concealed rocks; Wafangdian area